

На правах рукописи



Лобач Иван Александрович

**Генерация узкополосного перестраиваемого излучения в
волоконных лазерах с динамической распределенной
обратной связью**

1.3.19 «Лазерная физика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный консультант:	Профессор РАН, доктор физико-математических наук Каблуков Сергей Иванович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, Ушаков Николай Александрович Высшая школа прикладной физики и космических технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор физико-математических наук, Профессор Антипов Олег Леонидович Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, доктор физико-математических наук, Профессор Криштоп Виктор Владимирович ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Защита состоится 5 февраля 2027 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.070.02, созданного на базе ИЛФ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЛФ СО РАН: <https://laser.nsc.ru/disovet/>. Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 15Б.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



А.Г. Березуцкий

Общая характеристика работы

Актуальность

Волоконные лазеры и усилители, появившиеся как результат симбиоза лазерной физики и волоконной оптики, справедливо считаются одним из наиболее значимых технологических прорывов в области фотоники за последние десятилетия. Их уникальная архитектура, в которой активная среда, резонатор и волновод интегрированы в одном оптическом волокне, обеспечила ряд превосходных эксплуатационных характеристик, недостижимых для традиционных твердотельных или газовых аналогов. Среди преимуществ волоконных лазеров можно отметить компактность, высокое качество выходного пучка, высокую энергоэффективность и эффективный теплоотвод, высокую мощность, разнообразие режимов генерации и т. д. Последнее преимущество включает в себя возможность реализации разнообразных режимов работы лазера — от непрерывного до генерации ультракоротких импульсов (в режимах модулированной добротности или синхронизации мод). Особой ценностью для практических задач являются узкополосные и, в особенности, одночастотные лазеры (то есть генерирующие одну продольную моду), которые обладают широким спектром применений. Особую ценность им придаёт возможность перестройки центральной длины волны. Такие источники востребованы в оптической связи, сенсорике, спектроскопии и ряде других областей. В общем случае задача получения генерации на одной продольной моде нетривиальна, т.к. резонатор лазера может поддерживать огромное количество продольных мод (до миллионов), попадающих в контур усиления. Для обеспечения одночастотного режима генерации применяют два основных подхода. Первый подход связан с уменьшением длины резонатора. При этом продольные моды «разъезжаются» по частоте, и при достаточно малой длине в контур усиления попадает только одна мода. Этот подход реализуется в схемах с распределенным брэгговским отражателем или с распределенной обратной связью (РОС), где отражатель и активная среда совмещены. Непрерывная селекция, совмещенная с процессом усиления, не дает шансов для генерации побочных продольных мод. По этой причине **распределённая обратная связь** — один из мощных подходов для получения одночастотной генерации. Второй подход основан на уменьшении спектральной ширины селектора. В волоконных лазерах основным элементом селекции служат волоконные брэгговские решетки (ВБР), которые в большинстве случаев не позволяют достичь одночастотной генерации из-за их малой

длины около нескольких см. Увеличение длины ограничено технологическими возможностями записи решеток. Отдельным типом длинного селектора является рэлеевское рассеяние в волокне, которое можно рассматривать как случайную ВБР. Такие структуры в лазерах часто называют системой со случайной распределённой обратной связью, где усиление и обратная связь за счет рэлеевского рассеяния совмещены в одной среде. Особый интерес представляют длинные селекторы, формирующиеся непосредственно под воздействием излучения и исчезающие при его пропадании. Такие решетки называются динамическими. Известно два механизма их формирования в волокнах: первый — за счет электрострикции (бриллюэновские динамические решетки), второй — за счет модуляции инверсной населенности в волокнах с лазерными переходами (динамические решетки населенности или ДРН). Поскольку в последнем случае длинная обратная связь совмещена с активной средой лазера, то в этом случае реализуется **“динамическая распределенная обратная связь”**. ДРН обычно формируются двумя взаимно когерентными непрерывными лазерными волнами одинаковой поляризации, распространяющимися в противоположных направлениях в легированном волокне. Формирование ДРН происходит в результате неравномерного взаимодействия стоячей световой волны с резонансными переходами ионов редкоземельных элементов вдоль волокна. Узлы и пучности этой волны создают чередующиеся зоны с высоким и низким уровнями инверсии населенности соответственно. Известно, что ДРН в поглощающей среде приводит к стабилизации частоты генерации, а ДРН в усиливающей среде (так называемый эффект пространственного выжигания дыр или ПВД), наоборот, приводит к нестабильности частоты генерации. Важно отметить, что динамическая распределенная обратная связь на основе ДРН позволяет не только получать одночастотное излучение, но и при определенных условиях добиваться перестройки частоты. Примечательно, что перестройка происходит естественным образом, без внешнего вмешательства — реализуется режим самоиндуцированного сканирования или самосканирования частоты (ССЧ).

Такое поведение длины волны генерации было впервые упомянуто на раннем этапе развития лазерной физики в твердотельных лазерах [1]. Первоначально этот эффект считался паразитным, и для его подавления предпринимались попытки устранить стоячую волну. Прошло более 20 лет, прежде чем подобные эффекты ССЧ были обнаружены в других видах лазеров с зеркалом с обращением волнового фронта (см. монографию [2] и ссылки в ней).

Однако существенного развития этого эффекта после указанных работ не последовало.

Регулярная «нестабильность длины волны генерации» в волоконных лазерах впервые наблюдалась в работах [3-4]. Только в 2011 году две группы исследователей независимо наблюдали эффект ССЧ в широком диапазоне. Кириянов и Ильичев [5], а также Лобач и др. [6] нестабильность длины волны генерации в волоконных лазерах уже рассматривали как эффект ССЧ. В этих работах были проведены первые комплексные исследования. Авторы обеих работ пришли к выводу, что в основе спектральной динамики лежит эффект ПВД, который способствует перескоку частоты.

Таким образом можно заключить, что распределенная обратная связь может быть использована для достижения одночастотной генерации в лазере. При этом в случае динамической распределенной обратной связи также возможно получение эффекта ССЧ. В настоящей работе основные усилия были направлены на исследование волоконных лазеров, в которых протяженная активная среда выполняет функцию как усиления, так и обратной связи, а также тому, как в подобных лазерах формируется спектр генерации. При этом основной упор в работе делается на динамическую РОС, которая существует только в присутствии излучения. На момент начала работ в исследованиях подобных лазеров оставалось множество «белых пятен», связанных с измерением модового состава излучения, механизмов эффекта ССЧ, влияния свойств активной среды на параметры эффекта ССЧ. Помимо этого, отсутствовали работы, подтверждающие практическую ценность лазеров с ССЧ.

Цель работы

Основная цель настоящей диссертационной работы — разработка методов генерации узкополосного перестраиваемого излучения в волоконных лазерах с динамической распределенной обратной связью и исследование возможностей дальнейшего применения этого излучения.

Задачи работы

1. Реализовать режим самосканирования частоты в волоконных лазерах с динамической распределённой обратной связью на основе активных волокон, легированных как иттербием, так и другими добавками: висмутом, тулием и гольмием. Исследовать возможности управления параметрами режима генерации.

2. Адаптировать методы спектрального анализа для характеристики спектров, динамически изменяющихся во времени. Исследовать режимы самосканирования частоты в указанных лазерах и провести сравнительный анализ их характеристик.
3. Выявить механизмы, влияющие на формирование спектрального состава излучения в волоконных лазерах с распределенной обратной связью.
4. Исследовать возможность практического применения разработанных лазеров для решения различных задач.

Научная новизна

Полученные в диссертации экспериментальные результаты позволили сформировать целостное представление об универсальном механизме генерации узкополосного перестраиваемого излучения в волоконных лазерах с динамической распределенной обратной связью. Данный механизм представляет собой циклический процесс, включающий генерацию стоячей волны, формирование в активной среде динамической решетки усиления/поглощения и показателя преломления, обладающей уникальной спектральной функцией отражения, и последующее изменение модового состава излучения. Универсальность механизма подтверждена на четырех активных средах, перекрывающих спектральный диапазон от 1,06 до 2,1 мкм; при этом в иттербиевой и тулиевой средах достигнуты рекордные ширины диапазонов перестройки — 25 и 26 нм соответственно. Впервые режим ССЧ реализован для висмутовой активной среды. Впервые экспериментально реализованы режимы одночастотного ССЧ с дискретной и квазинепрерывной перестройкой частоты, характеризующиеся фазовой корреляцией между соседними импульсами. В таких режимах лазер генерирует последовательность импульсов, каждый из которых соответствует одной продольной моде резонатора, при этом перестройка частоты между импульсами происходит на фиксированную величину, равную области свободной дисперсии резонатора. В пределах длительности одиночного импульса наблюдается частотный чирп, не превышающий 1 МГц, обусловленный изменением уровня инверсии в резонаторе в процессе генерации. Одночастотный характер ССЧ обеспечивается узким спектром отражения динамической решетки. Фазовая корреляция между импульсами обусловлена эффектом четырехволнового взаимодействия, при котором две последовательно генерируемые моды на протяжении небольшого периода одновременной генерации формируют сфазированную затравку для генерации последующей моды. Впервые продемонстрирована

возможность когерентного сложения 18 последовательных мод волоконного лазера, что позволило сформировать импульсы длительностью 6 нс. Впервые обнаружена мультистабильность режимов генерации в тулиевом волоконном лазере с динамической распределенной обратной связью: переключение между режимами прямого и обратного ССЧ, а также режимом стабилизации частоты осуществляется вариацией мощности накачки. Кроме того, впервые получена лазерная генерация в висмутовом волоконном лазере со случайной распределенной обратной связью. Показано, что данный лазер демонстрирует меньший рост ширины спектра генерации с увеличением мощности накачки по сравнению с аналогичным лазером, использующим классический резонатор Фабри–Перо. Указанное поведение связано с локализацией участка повышенной мощности внутри резонатора лазера с распределенной обратной связью, что приводит к уменьшению вклада нелинейных эффектов, ответственных за уширение спектра.

Практическая значимость

Разработанные лазеры являются простыми и надёжными источниками узкополосного перестраиваемого излучения, перекрывающими спектральный диапазон 1–2,1 мкм. Представленные в работе экспериментальные результаты подтверждают эффективность разработанных лазеров для решения широкого круга прикладных задач. В их числе — спектральная характеристика волоконно-оптических компонентов и газовых сред, распределенные температурные измерения, вибродальнометрия, а также формирование коротких импульсов методом Фурье-синтеза.

Защищаемые положения

1. В линейном резонаторе волоконного лазера с динамической распределенной обратной связью на основе активных волокон, легированных иттербием, висмутом, тулием или гольмием, реализуется универсальный механизм генерации — режим самосканирования оптической частоты/длины волны, который обеспечивает перестройку излучения в широком спектральном интервале (> 9 нм).
2. Оптимизация пространственного положения активного волокна, легированного иттербием, висмутом или тулием, в линейном резонаторе волоконного лазера с динамической распределенной обратной связью обеспечивает получение режима одночастотного самосканирования частоты,

при котором каждый генерируемый импульс (модовый импульс) соответствует излучению на одной продольной моде резонатора.

3. С ростом мощности в волоконном лазере с линейным резонатором и динамической распределенной обратной связью на основе активных волокон, легированных иттербием или висмутом, хвосты соседних модовых импульсов начинают перекрываться по уровню 10% и более от максимальной амплитуды, а фазы модовых импульсов становятся коррелированными.

4. Увеличение длины активного волокна, легированного висмутом, в волоконном лазере с динамической распределенной обратной связью позволяет уменьшить шаг дискретной перестройки частоты при последовательной генерации модовых импульсов, вплоть до величины сдвига частоты, наблюдаемого во время генерации одиночных модовых импульсов.

5. Управление мощностью излучения накачки в линейном резонаторе волоконного лазера с динамической распределенной обратной связью на основе активного волокна, легированного тулием, обеспечивает переключение между тремя режимами генерации: прямым самосканированием, обратным самосканированием и стабилизацией оптической частоты.

6. Применение случайной распределённой обратной связи с полуоткрытым резонатором в волоконном лазере на основе активного волокна, легированного висмутом, обеспечивает сужение линии генерации более чем в 2 раза по сравнению с эквивалентным лазером с резонатором Фабри–Перо при одинаковой мощности накачки и одинаковом спектрально-селективном плотном зеркале.

7. Волоконный самосканирующий лазер, генерирующий последовательность модовых импульсов, обеспечивает решение ряда прикладных задач, требующих использования перестраиваемых источников излучения, включающих высокоразрешающую (~5 МГц) характеристику волоконно-оптических элементов и газовых сред, распределенные температурные измерения, вибродактилometriю и Фурье-синтез коротких импульсов.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, были доложены на 22 международных и всероссийских конференциях, в том числе: Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2013, 2015, 2017, 2019); Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2014, 2016, 2018); Конференция «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Новосибирск, 2019); Международная конференция «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика» (Пермь, 2016, 2018, 2020); Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics (Новосибирск, 2015); International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2018, 2020); International Laser Physics Workshop (Прага, Чехия, 2013; Шанхай, Китай, 2015; Ереван, Армения, 2016); SPIE/COS Photonics Asia (Пекин, Китай, 2018; Наньтун, Цзянсу, Китай, 2021, 2022); Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (Мюнхен, Германия, 2017); SPIE Photonics West (Сан-Франциско, США, 2012). Кроме того, основные положения работы были представлены на научных семинарах Института автоматики и электрометрии СО РАН (13 марта 2014 г.; 15 ноября 2015 г.; 4 мая 2017 г.; 20 декабря 2018 г.; 02 июля 2026 г.).

Личный вклад автора

Диссертационная работа проводилась в лабораториях волоконной оптики и оптических сенсорных систем ИАиЭ СО РАН совместно с сотрудниками лабораторий. Все указанные в диссертации результаты получены автором лично либо под его научным руководством, а вклад в планирование и проведение экспериментов был определяющим.

Представленная в работе аналитическая модель создана в ходе совместной работы с членом-корреспондентом РАН, д.ф.-м.н. Е.В. Подивиловым и приведена с его согласия.

Автор выражает огромную благодарность всем своим соавторам: С.И. Каблукову, С.А. Бабину, Е.В. Подивилу, А.А. Фотиади, Е.И. Петиной (Донцовой), Е.А. Злобиной (Евменовой), Д.А. Кривошеиной, Н.Н. Смолянинову, Д.В. Чуркину, М.А. Мелькумову, А.А. Вольфу, А.В. Достовалову, В.А. Камынину, М.И. Скворцову, Ю.А. Тимиртдинову, П.Л. Чаповскому, В.Ф. Хопину и Е.М. Дианову, Н.Р. Поддубровскому, А.Ю. Ткаченко, А.Д. Владимирской, А.Е. Бударных, Р.В. Дробышеву, Е.А. Кашириной и А.М. Воликовой за совместную плодотворную работу.

Публикации

Основные результаты работы по тематике диссертации опубликованы в 21 статье в рецензируемых журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией [A1-A21]. Из них 14 публикаций относятся к журналам первого уровня («квартиль 1»), 7 — к журналам второго уровня согласно действующей классификации. Кроме того, результаты представлены в других печатных работах: в 3 статьях в рецензируемых журналах [A22-A24], а также в 18 статьях в сборниках трудов международных конференций [A25-A42]. Также имеется три патента [A43-A45].

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, одного приложения, а также списка сокращений. Диссертация изложена на 296 страницах текста, содержит 112 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 307 наименования.

Основное содержание работы

Во введении описана область науки, в которой проводились исследования, приведен обзор публикаций, подтверждающий актуальность работы, и сформулированы цели и задачи работы. В конце приведено краткое содержание диссертации и сформулированы защищаемые положения. Узкополосная перестройка длины волны экспериментально достигнута в широком спектральном интервале 1–2,1 мкм для активных сред на основе Yb, Bi, Tm и Ho. Это определило структуру диссертации, построенную по трем спектральным направлениям: иттербиевые лазеры (~1 мкм), висмутовые (~1,5 мкм), а также тулиевые и гольмиевые лазеры (~2 мкм).

Решение взаимосвязанных задач 1–3 осуществлялось комплексно применительно к каждому типу волоконных лазеров, с обязательным учетом особенностей соответствующих легирующих добавок; полученные результаты поэтапно изложены в главах 2–4. Задача 4, относящаяся к исследованию возможностей практического применения, выделена в отдельную главу 5.

В первой главе собраны теоретические и экспериментальные подходы, которые были использованы при выполнении настоящей диссертационной работы. В параграфе 1.1 рассмотрены физические процессы, ответственные за формирование спектральной линии волоконных лазеров. Особое внимание было уделено возможности получения генерации на одной продольной моде. В параграфе 1.2 приведены теоретические выражения, описывающие воло-

конный лазер с линейным резонатором на основе динамической РОС [7]. Ключевая идея модели заключается в том, что в среде с инверсией за счёт двух встречных волн формируется динамическая решётка, причём прямая и обратная волны взаимодействуют через решётки, записанные более ранними продольными модами. Данные выражения применялись как для математического моделирования, так и для качественного объяснения наблюдаемых характеристик. На основе представленных уравнений также показан вывод аналитических соотношений для формы импульса, частотного чирпа и инкремента нарастания мод в режиме ССЧ. Проведённый анализ показал, что модовый состав генерации существенно зависит от соотношения амплитудной и фазовой составляющих ДРН. Кроме того, в параграфе приведены упрощённые выражения для спектра отражения динамической РОС, позволяющие оценить модовый состав излучения в режиме ССЧ.

В параграфе 1.3 описаны методы экспериментального исследования излучения, применявшиеся в настоящей диссертации. Основное внимание уделено методам быстрого спектрального анализа лазерного излучения, включающим как стандартные приборы (решёточные спектроанализаторы и Фурье-спектрометры), так и подходы, адаптированные под специфику лазерного излучения, — интерферометрические методы и метод гетеродинирования. В параграфе 1.4 приведены основные результаты по главе.

Во **второй главе** представлены разработка и экспериментальное исследование нескольких конфигураций волоконных иттербиевых лазеров с динамической РОС, демонстрирующих одночастотное ССЧ в широком спектральном диапазоне, превышающем 25 нм (рис.1). Надо отметить, что это значение является рекордным для иттербиевых лазеров. В параграфе 2.1 кратко описаны особенности иттербиевой активной среды.

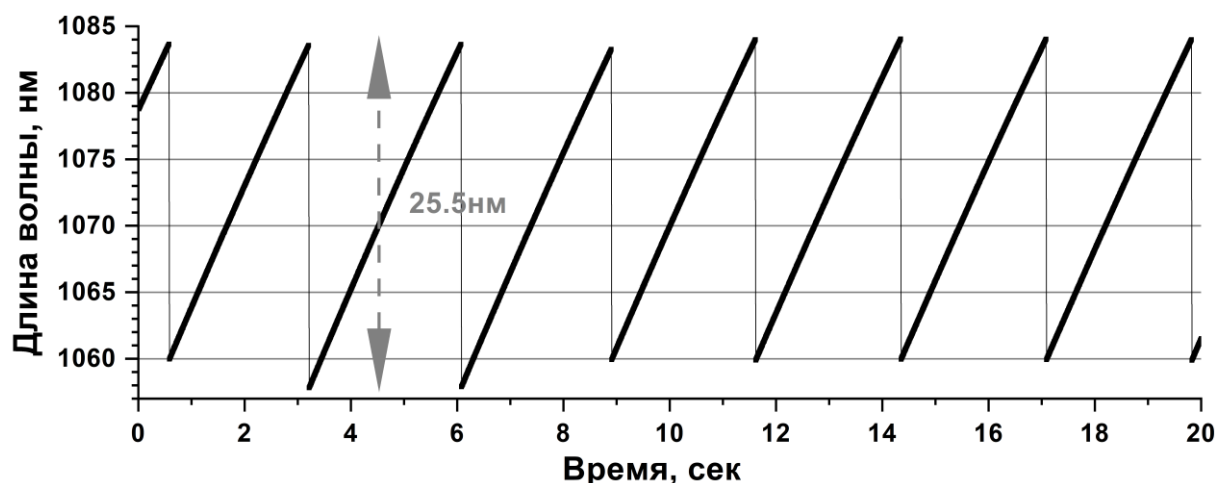


Рис. 1. Динамика длины волны иттербиевого лазера с ССЧ с диапазоном 25,5 нм.

Параграф 2.2 посвящен исследованию иттербиевого одночастотного волоконного лазера с ССЧ. Показано, что при сохранении регулярного режима ССЧ динамика интенсивности существенно зависит от положения активной среды в резонаторе: наблюдаются как стохастические импульсы, соответствующие одновременной генерации большого числа мод (рис.2а), так и регулярные режимы с генерацией последовательности микросекундных импульсов (рис.2б). Установлено, что в последнем случае генерация является одночастотной, то есть в каждый момент времени существует лишь одна продольная мода. Такое поведение интерпретируется на основе выражений для инкремента роста, представленных в первой главе: в многочастотном режиме сканирования наибольший инкремент имеют множество мод, тогда как в одночастотном режиме максимальный инкремент достигается только для одной моды. С помощью техники гетеродинирования для одночастотных периодических импульсов измерена мгновенная частота каждого импульса. Обнаружено, что сдвиг частоты между соседними импульсами соответствует одной области свободной дисперсии резонатора, а каждый импульс обладает собственным частотным чирпом величиной <1 МГц (рис.2в). Изменение частоты можно объяснить изменением среднего показателя преломления за счет изменения инверсной населенности в процессе генерации импульса.

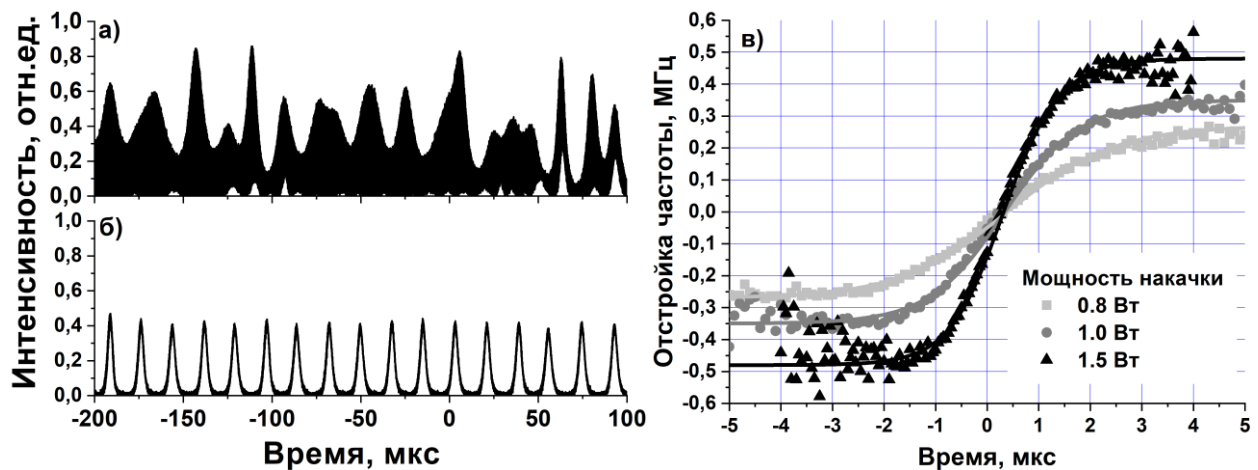


Рис. 2. Динамические характеристики генерации иттербиевого волоконного лазера с ССЧ: (а) многочастотный и (б) одночастотный режим ССЧ; (в) мгновенная частота лазера одного импульса при различных уровнях мощности накачки.

Также установлено, что уменьшение добротности резонатора приводит к расширению области допустимых мощностей накачки, в которой реализуется режим ССЧ. При значительной мощности накачки наблюдался режим генерации, при котором соседние импульсы начинают перекрываться во вре-

мени. В таких условиях выявлена фазовая связь между последовательно генерируемыми импульсами, что объясняется процессами четырёхволнового смешения, когда две последовательные моды формируют затравку для следующей моды с заданной фазой. В параграфе 2.3 приведены основные результаты по главе.

В третьей главе представлены разработка и экспериментальное исследование нескольких конфигураций волоконных висмутовых лазеров. В параграфе 3.1 кратко описаны особенности висмутовой активной среды. Отличительной особенностью висмутовых активных волокон является низкая концентрация легирующего иона, что обуславливает необходимость использования относительно больших длин волокна. Данная особенность, однако, делает такие волокна привлекательной платформой для создания лазеров с различными типами РОС. В параграфе 3.2 впервые продемонстрирован висмутовый лазер с динамической РОС на основе активного волокна длиной 60 м, в котором реализован режим одночастотного ССЧ с диапазоном перестройки более 10 нм (рис. 3а). Аналогично случаю иттербиевых лазеров, наблюдалась генерация последовательности регулярных одночастотных импульсов (рис. 3а). При увеличении мощности накачки зафиксировано перекрытие импульсов во времени (рис. 3б) и их фазовая синхронизация. Характерной особенностью данного режима является то, что шаг перестройки между соседними модовыми импульсами $\sim 1,1$ МГц становится соизмеримым со сдвигом частоты за время генерации одиночного импульса $\sim 0,9$ МГц (рис. 3в). Такое соотношение параметров позволяет существенно уменьшить разрывы в спектральной перестройке, что важно для ряда практических приложений.

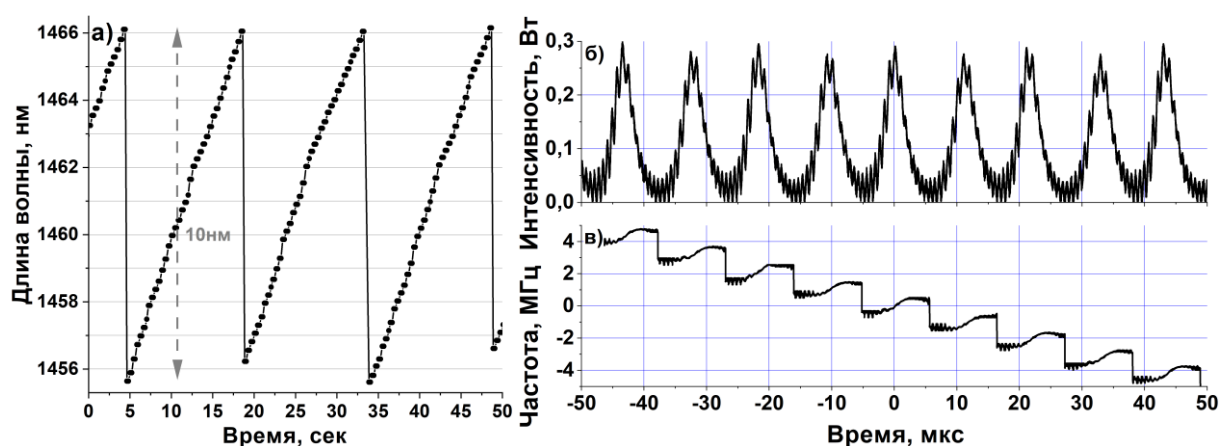


Рис. 3. Динамические характеристики висмутового волоконного лазера в режиме ССЧ: (а) длина волны, (б) интенсивность и (в) мгновенная частота генерации.

В параграфе 3.3 приводится описание первого висмутового лазера со случайной РОС, в котором функции усиления и обратной связи реализованы

в одном волоконном световоде не за счёт вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), а на основе непосредственного использования лазерных переходов активной среды. Экспериментально установлено, что такой источник демонстрирует свойства, характерные для ВКР-волоконных лазеров со случайной РОС: безмодовую структуру спектра, квазинепрерывную динамику интенсивности и уширение спектра с ростом мощности накачки. Однако в отличие от ВКР-систем, спектральный диапазон генерации в данном случае определяется исключительно свойствами активной среды и не привязан к частоте накачки или фиксированному стоксовому сдвигу. Также полученные результаты показывают, что лазер со случайной РОС демонстрирует существенно меньшее спектральное уширение по сравнению с традиционными конфигурациями, использующими точечный отражатель – отражение Френеля $\sim 4\%$ (рис. 4). Данное поведение объясняется тем, что спектральное уширение в основном обусловлено фазовой самомодуляцией, причём в случае случайной РОС нелинейный набег фазы накапливается лишь в части резонатора (в активной среде), тогда как в классическом резонаторе он имеет место на всем протяжении резонатора. В параграфе 3.4 приведены основные результаты по главе.

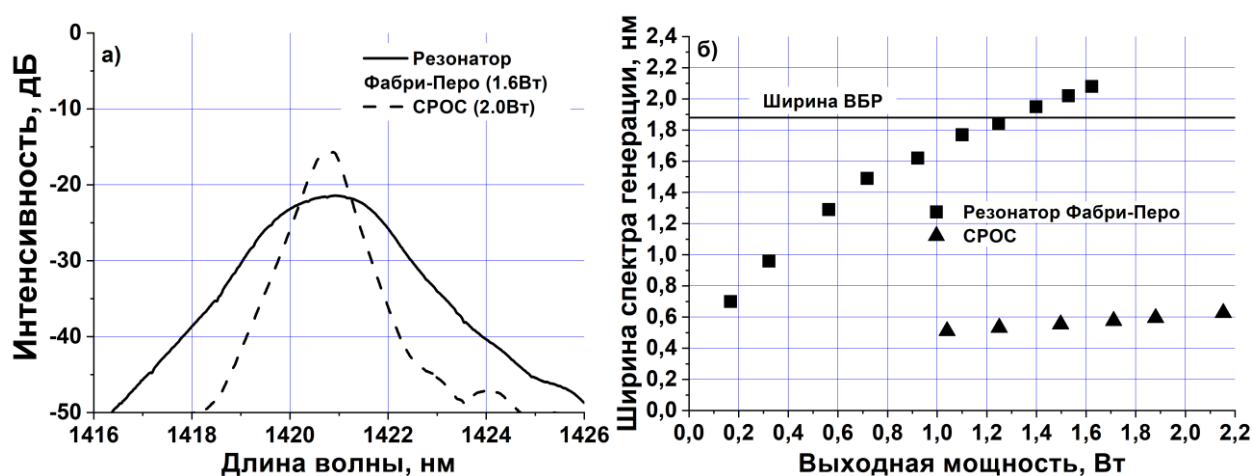


Рис. 4. (а) Спектры генерации и (б) зависимость ширины спектра генерации от мощности генерации в различных конфигурациях висмутового лазера.

Четвертая глава посвящена волоконным лазерам на основе волокон, легированных тулием и гольмием. В результате работы было создано несколько конфигураций волоконных тулиевых и гольмиевых ССЧ-лазеров с генерацией в области ~ 1.92 мкм и ~ 2.06 мкм соответственно, каждый из которых обладал своими уникальными характеристиками. В параграфе 4.1 обсуждается актуальность получения двухмикронного излучения в тулиевых и гольмиевых волоконных лазерах

Параграф 4.2 посвящён тулиевому лазеру с накачкой на длине волны 1540 нм, в котором достигнут одночастотный режим ССЧ (аналогичный иттербиевому и висмутовому лазерам) с диапазоном перестройки до 26 нм, что на сегодняшний день является рекордным значением для тулиевых лазеров.

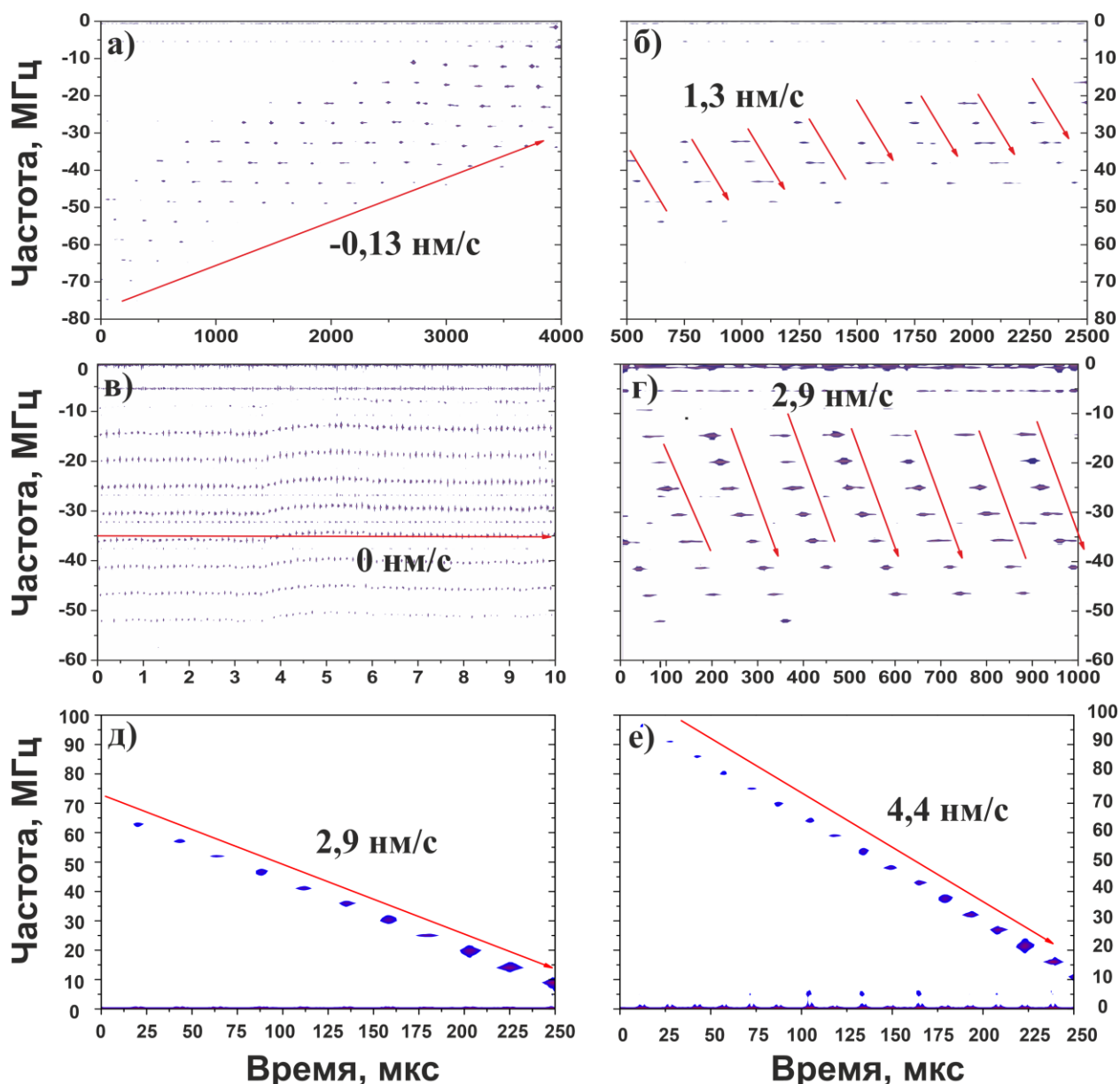


Рис. 5. Динамика мгновенной частоты генерации тулиевого лазера при различных уровнях мощности накачки: 320 мВт (а, б), 440 мВт (в, г), 470 мВт (д) и 650 мВт (е). Наблюдается последовательная смена режимов: обратное ССЧ, остановка длины волны и прямое ССЧ.

В параграфе 4.3 показано, что изменение длины волны накачки с 1540 нм на 1570 нм кардинально меняет поведение генерации. При варьировании мощности накачки наблюдалось переключение между тремя режимами: обратное сканирование (перестройка в коротковолновую область, рис.5а), прямое сканирование (перестройка в длинноволновую область, рис.5д и рис.5е) и остановка длины волны (рис.5в и рис.5г). Выбор режима

сканирования осуществлялся вручную посредством регулировки мощности лазера накачки. Впервые продемонстрирована возможность остановки длины волны в диапазоне от 1912 до 1923 нм. При этом уход длины волны за время измерения (5 минут) составлял менее 50 пм. Высокоразрешающий спектральный анализ показал, что в режиме остановки длины волны фактически реализуется сканирование частоты с ультракоротким диапазоном перестройки (~50 МГц) при незначительном дрейфе средней длины волны (Рис.5г). Показано, что при анализе эффекта ССЧ необходимо учитывать не только динамические решётки усиления и показателя преломления, но и решётки поглощения, формирующиеся в непрокачанной части активного волокна, имеющие противоположный вклад в спектральную динамику.

В рамках работы также создано несколько конфигураций гольмиевых волоконных лазеров с ССЧ. В параграфе 4.4 для конфигурации лазера на основе изотропного гольмиевого волокна продемонстрирован диапазон сканирования 7 нм в области 2070 нм, а в параграфе 4.5 конфигурации лазера на основе анизотропного волокна— 10 нм в области 2100 нм (рис.6). Последний результат является рекордным для гольмиевых лазеров. Ввиду большого квантового дефекта между длиной волны накачки (1,15 мкм) и генерации (2,1 мкм) наблюдались эффекты, связанные с разогревом активного волокна, которые приводили к нестабильности генерации. Для обеспечения стабильной работы гольмиевого лазера применялись методы охлаждения активного волокна. В последнем случае была достигнута долговременная стабильность режима ССЧ.

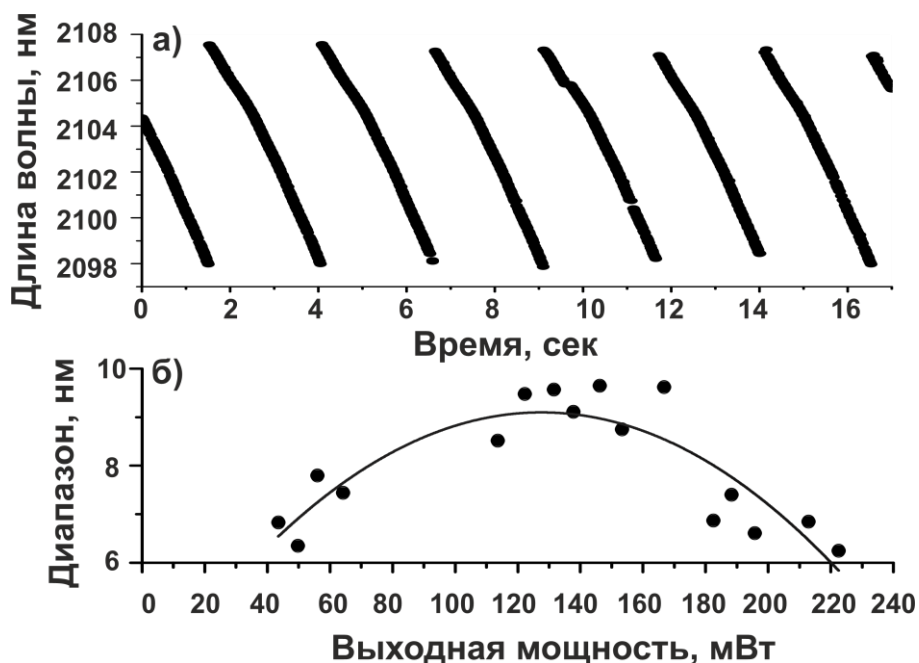


Рис. 6. (а) Динамика длины волны и (б) диапазон сканирования гольмиевого лазера с ССЧ

Кроме того, динамические решётки в поглощающем гольмиевом волокне были использованы не только для реализации режима ССЧ, но и для получения стабильной одночастотной генерации. Результаты приведены в параграфе 4.6. С использованием спектральной селекции на основе динамической решётки населённостей получена генерация в области 2,1 мкм с шириной линии не более 2 МГц. В параграфе 4.7 приведены основные результаты по главе.

Пятая глава посвящена использованию созданных источников излучения. В данном разделе продемонстрированы применения иттербиевых и тулиевых лазеров с динамической РОС. В параграфе 5.1 обсуждены особенности излучения лазеров с ССЧ в контексте их практического применения. В параграфе 5.2 приведено описание процедуры обработки сигналов с учётом особенностей излучения лазеров с ССЧ. Рассматриваемые лазеры функционируют в импульсном режиме, генерируя микросекундные импульсы, каждый из которых соответствует одной продольной моде. При этом оптическая частота от импульса к импульсу изменяется на величину, равную ОСД. В наиболее общем случае лазер с ССЧ применяется для спектральной характеристики различных сред и материалов. Для компенсации импульсного характера динамики интенсивности описана процедура поимпульсной нормировки полезного сигнала на опорный.

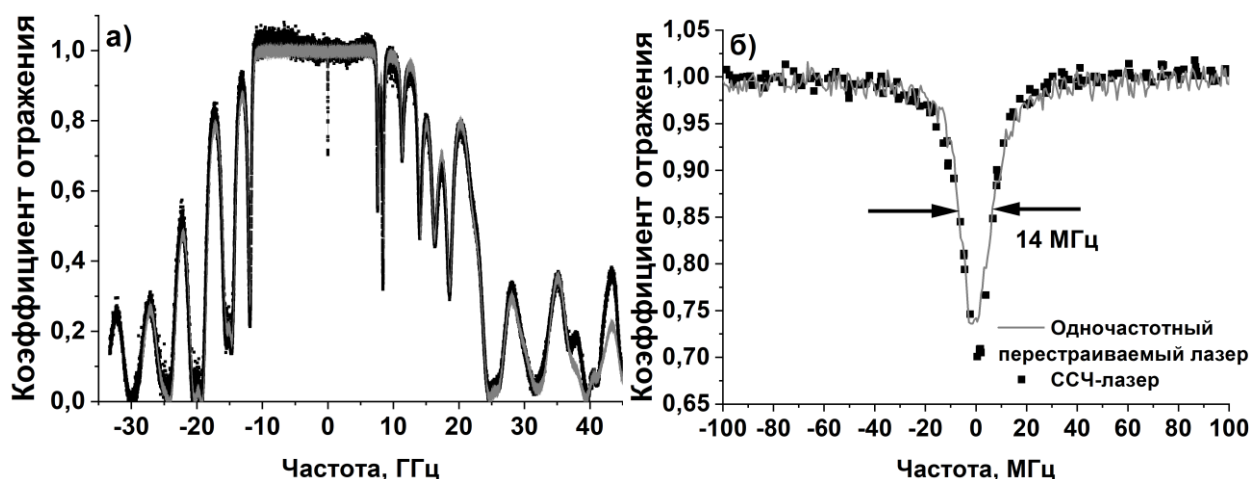


Рис.7. Спектр отражения π -ВБР, измеренный с помощью ССЧ-лазера (точки) и одночастотного перестраиваемого лазера (сплошная линия) в широкой области спектра (а) и в узкой области структуры (б).

В параграфе 5.3 приведены результаты демонстрации применения лазеров с ССЧ для измерения оптических свойств различных волоконно-оптических элементов, а именно: спектров отражения ВБР с фазовым сдви-

гом, поляризационных характеристик длиннопериодных волоконных решёток, а также спектров квазисинхронизма периодически-поляризованных волокон. В частности, при измерении спектра отражения ВБР с фазовым сдвигом удалось разрешить спектральные структуры шириной 14 МГц (точки на рис. 7). Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными, измеренными с использованием классического одночастотного перестраиваемого лазера (сплошные линии на рис. 7).

В параграфе 5.4 представлены результаты применения тулиевого лазера с ССЧ для спектроскопии поглощения паров воды в атмосфере. В качественном эксперименте (параграф 5.4.1) выходной пучок лазера коллимировался линзой и направлялся вдоль открытой воздушной трассы длиной 40 см, заполненной комнатным лабораторным воздухом. Измеренный спектр поглощения воды хорошо согласуется с результатами моделирования, выполненного с использованием базы данных HITRAN (рис. 8).

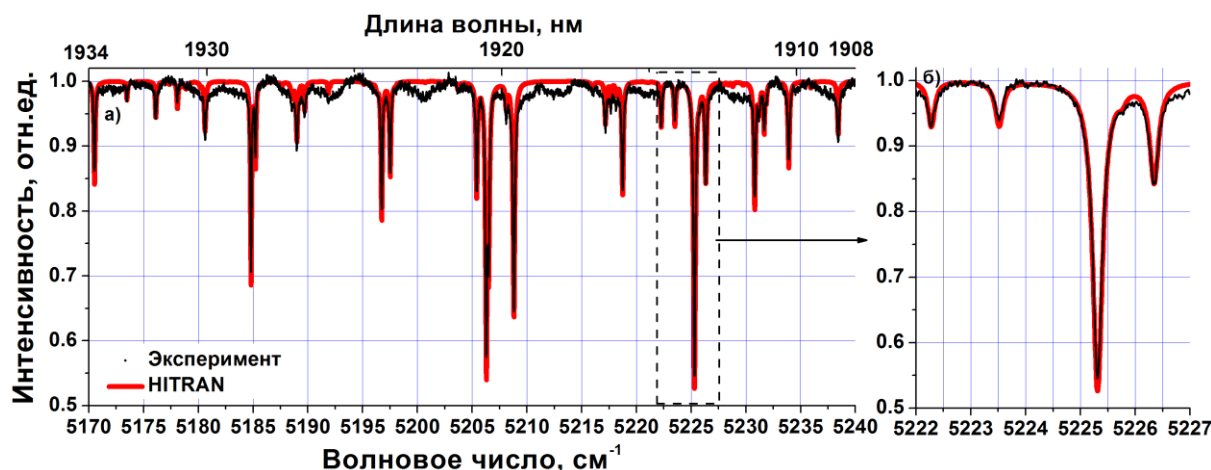


Рис. 8. Линия поглощения воды для сигнала, прошедшего через 40 см воздуха (точки), в сравнении с данными моделирования HITRAN (линия) в широкой области спектра (а) и в узкой области (б).

На следующем этапе проведён количественный эксперимент (параграф 5.4.2), в котором измерялись не только положения линий поглощения, но и коэффициенты поглощения для каждой линии. Таким образом, была предпринята попытка создания спектрометра на основе лазера с ССЧ. Для этого схема измерения была модифицирована. Исследуемые пары воды содержались в герметичной стеклянной кювете с аппендиксом, заполненным жидкой водой. Перед экспериментом кювета и вода в ней тщательно обезгаживались. Для учёта небольшого поглощения излучения в воздухе вне кюветы вода в аппендиксе замораживалась с помощью жидкого азота, после чего спектр измерялся дополнительно и учитывался при последующем анализе. Эти из-

мерения позволили определить орто/пара отношение спиновых изомеров молекул воды, которое составило $3,06 \pm 0,02$, что хорошо согласуется с известными литературными данными при комнатной температуре [8].

В параграфе 5.5 иттербиевый лазер с ССЧ применён для высокоразрешающего анализа лазерных спектров. Принцип работы анализатора основан на усилении за счёт вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) [9] в оптическом волокне (длина составляла около 30 метров), при этом лазер с ССЧ использовался в качестве перестраиваемого узкополосного источника накачки для ВРМБ-усилителя. Разработанный анализатор был апробирован для измерения спектров как широкополосных (ширина линии 10 ГГц), так и одночастотных (ширина линии 1 кГц) лазеров. Результаты измерений сравнивались с данными, полученными с помощью решёточного спектроанализатора с разрешением около 5 ГГц. Показано, что в отличие от решёточного анализатора, разработанный ВРМБ-анализатор на основе лазера с ССЧ позволяет регистрировать спектральный пик одночастотного излучения (рис.9). Спектральное разрешение анализатора составило порядка 23 МГц, что определяется шириной спектра ВРМБ-усиления в используемом волокне.

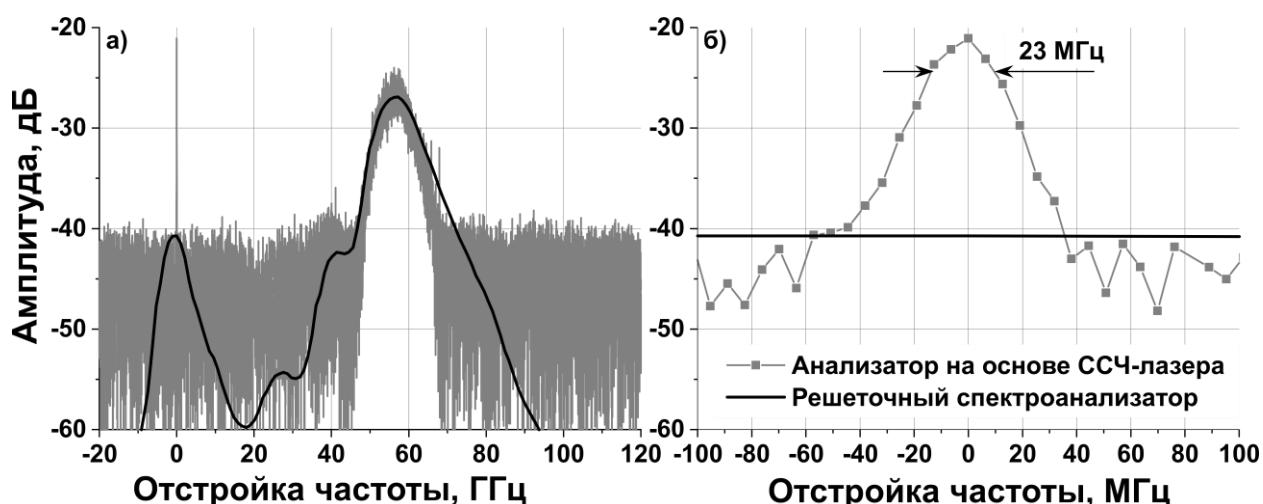


Рис. 9. Спектры излучения одночастотного и широкополосного лазеров, зарегистрированные с помощью анализатора на основе ССЧ-лазера (линия с точками) и решёточного спектроанализатора (сплошная линия) в (а) широком и (б) узком спектральном диапазоне.

Параграф 5.6 посвящён построению измерительных схем на основе оптической рефлектометрии частотной области [10], для которой ключевым элементом является высококогерентный перестраиваемый лазер. Для этих целей использовался иттербиевый лазер с одночастотным ССЧ. Одним из достоинств применения такого лазера является отсутствие необходимости в опорном интерферометре для линейаризации перестройки частоты (при вы-

полнении быстрого преобразования Фурье), поскольку линейность перестройки по частоте у лазеров с ССЧ достигается естественным образом — сканирование происходит строго по модам резонатора. Рефлектометр частотной области на основе лазера с ССЧ был оптимизирован для измерения уровня рэлеевского рассеяния в стандартном оптическом волокне (параграф 5.6.1). Продольная неоднородность показателя преломления может рассматриваться как случайная решётка, а её спектр рассеяния, аналогично спектру классической ВБР, чувствителен к внешним воздействиям (температуре и деформации). Для измерения спектра рассеяния выбранного участка волокна применялось обратное преобразование Фурье, а для анализа полученных спектров — кросс-корреляционный анализ. Корреляционные функции для участка волокна длиной 4 см представлены на рис.10а. Видно, что при нагреве происходит смещение пика корреляции относительно нулевого значения. Зависимость положения пика корреляции от температуры носит линейный характер с наклоном $\sim 1,95$ ГГц/°С (рис.10б). Также в параграфе обсуждаются возможности и ограничения предложенной схемы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения лазера с ССЧ для распределённых измерений в стандартном волокне.

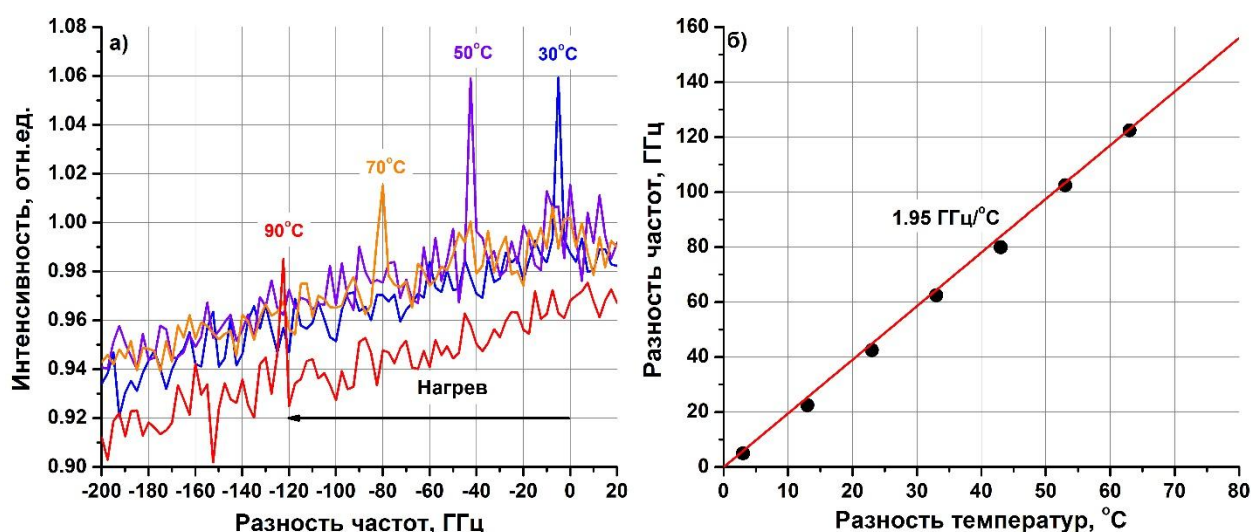


Рис. 10. (а) Функции корреляции для разных температур нагретого участка волокна длиной 4 см. (б) Зависимость положения пика корреляции от температуры.

Далее разработанная схема рефлектометра была применена для определения положения и частоты вибраций (вибро-дальнометрия) колеблющейся мишени в воздушном тракте (параграф 5.6.2). Принцип работы вибро-дальномера основан на том, что в дополнение к пику на рефлектограмме, соответствующему положению отражающей мишени, появляются боковые спектральные компоненты, отстройка которых

пропорциональна частоте колебаний мишени. Это связано с дополнительной модуляцией интерферограммы в процессе сканирования частоты. Для проверки данного подхода измерялась рефлектограмма для воздушной трассы с зеркалом и поворотным зеркалом, расположенным на пьезоэлементе. В отсутствие вибраций (а также при малых частотах) на рефлектограмме присутствует пик, соответствующий положению зеркала (рис.11а). При включении вибрации мишени появляются боковые пики, которые расходятся от основного пика с увеличением частоты модуляции, причём их отстройка линейно пропорциональна частоте вибраций (рис.11б,в,г). В параграфе также обсуждаются возможности и ограничения предложенной схемы. Полученные результаты свидетельствуют о применимости лазера с ССЧ для задач вибро-дальнометрии.

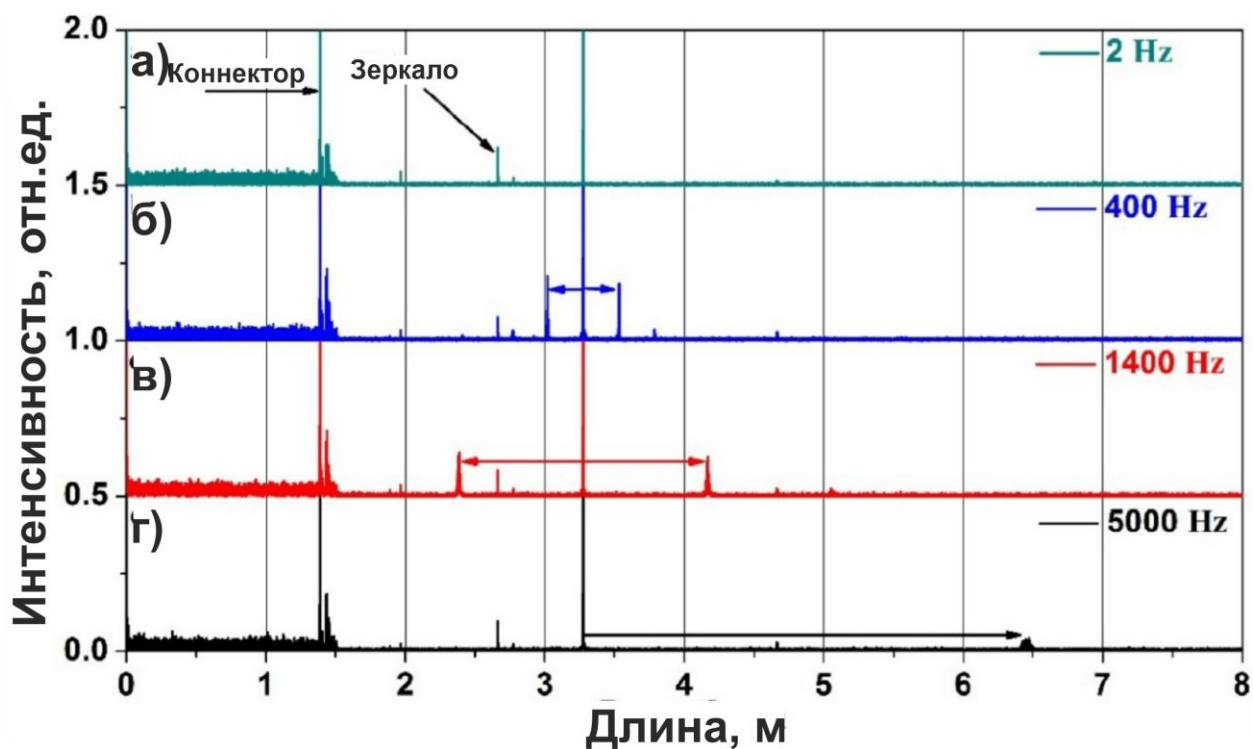


Рис. 11. Примеры рефлектограмм, измеренных при различных частотах вибрации: (а) 2, (б) 400, (в) 1400 и (г) 5000 Гц.

Параграф 5.7 посвящён демонстрации применения лазера с ССЧ для Фурье-синтеза коротких импульсов. Основная идея получения коротких импульсов заключается в сложении большого числа фазово-синхронизованных продольных мод по аналогии с лазером с синхронизацией мод. Для решения этой задачи перспективным представляется лазер с ССЧ, поскольку было показано, что его последовательные моды синхронизованы между собой. Для эксперимента излучение лазера направлялось во внешний резонатор с временем обхода, соответствующим периоду следования микросекундных импуль-

сов (рис.12). При этом каждый новый модовый импульс складывался с предыдущим с временной задержкой. На выходе резонатора наблюдались импульсы длительностью порядка 22 нс, что соответствует сложению 5 мод. Столь малое число складываемых мод связано с достаточно большими потерями на обход внешнего резонатора (2 дБ). Для компенсации этих потерь в резонатор был добавлен волоконный усилитель, который позволил снизить потери до 0,5 дБ, тем самым увеличив число складываемых мод и уменьшив длительность импульсов до 6 нс.

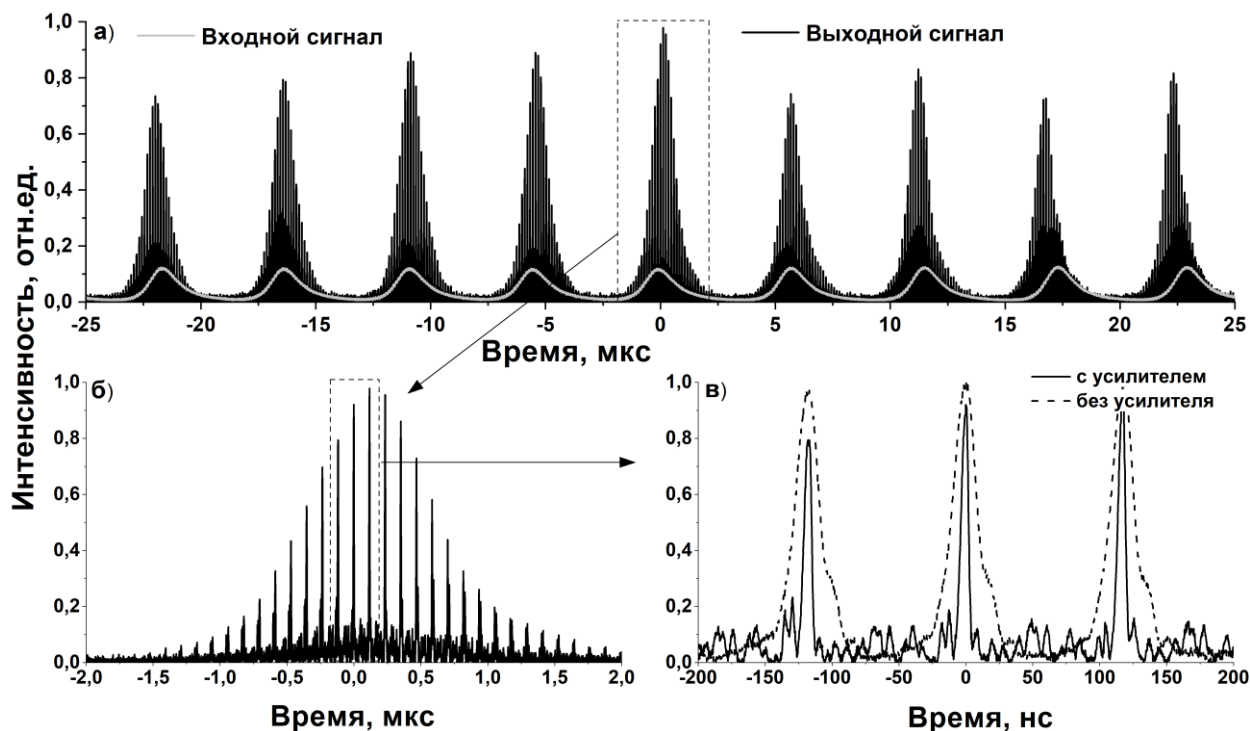


Рис. 12. Импульсы на входных и выходных портах кольцевого резонатора в разных временных масштабах (а-в), с внутрирезонаторным усилителем и без него (на в)).

В параграфе 5.8 приведены основные результаты по главе. Обсуждены свойства ССЧ-лазера, которые были необходимы в продемонстрированных задачах. Хотя проведенные эксперименты носят демонстрационный характер, полученные результаты подтверждают перспективность разработанных источников излучения.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **приложении А** приведена аналитическая модель волоконного лазера с динамической РОС на основе инкремента роста.

Основные результаты

1. Экспериментально показано, что в линейном резонаторе волоконного лазера с динамической распределенной обратной связью реализуется универсальный механизм генерации — режим самосканирования частоты. Процесс развивается циклично. Сначала происходит генерация стоячей волны на одной частоте, что приводит к насыщению усиления и записи динамических решеток (усиления и показателя преломления), обладающих высокой спектральной селективностью. Затем эти динамические решетки при генерации нового импульса релаксационных колебаний индуцируют генерацию стоячей волны на сдвинутой частоте. Демонстрация эффективности механизма выполнена на четырех активных средах, охватывающих широкий спектральный диапазон — от 1,06 до 2,1 мкм. В коротковолновой части (иттербиевое волокно, 1,06 мкм) и длинноволновой (тулиевое, 1,92 мкм) достигнуты рекордные перестройки 25 и 26 нм соответственно. Для висмутового (1,46 мкм) и гольмиевого (2,06 мкм) волокон перестройка составила по 9 нм.

2. Экспериментально установлено, что оптимизация положения активного волокна в линейном резонаторе волоконного лазера с динамической распределенной обратной связью обеспечивает переход в режим одночастотного самосканирования частоты. В данном режиме каждый генерируемый импульс представляет собой излучение на одной продольной моде резонатора (модовый импульс), при этом перестройка частоты между соседними модами импульсами происходит дискретно, с шагом, кратным области свободной дисперсии резонатора, и составляет от 1 до 10 МГц. В пределах длительности одиночного модового импульса частотный сдвиг не превышает 1 МГц. Режим реализован в иттербиевом, висмутовом и тулиевом волоконных лазерах.

3. Экспериментально установлено, что в лазерах с динамической распределенной обратной связью на основе иттербиевого и висмутового активных волокон достижим режим одночастотного самосканирования частоты с квазинепрерывной динамикой интенсивности. Отличительной чертой данного режима выступает частичное временное перекрытие соседних модовых импульсов, излучаемых на различных частотах, при сохранении их фазовой корреляции. При этом вариации относительной фазы между импульсами не превышают $0,2\pi$. Предложено объяснение наблюдаемой фазовой скоррелированности, основанное на эффекте четырехволнового взаимодействия в активной среде.

4. В висмутовом волоконном лазере с линейным резонатором и динамической распределенной обратной связью за счет применения длинного (60 м) слаболегированного активного волокна достигнут режим одночастотного самосканирования с квазинепрерывной спектральной динамикой. Характерной особенностью режима является то, что шаг перестройки между соседними модовыми импульсами (1,1 МГц) становится соизмеримым со сдвигом частоты за время генерации одного модового импульса (~0,9 МГц). Такое соотношение параметров позволяет существенно уменьшить разрывы (до ~20%) в спектральной перестройке.

5. Экспериментально показано, что в тулиевом волоконном лазере с линейным резонатором и динамической распределённой обратной связью возможны три режима генерации: прямое самосканирование частоты, обратное самосканирование частоты и стабилизация оптической частоты (дрейф не более 50 пм за 5 минут). Переключение между режимами осуществляется вариацией мощности накачки. Выявлено, что режим обратного самосканирования частоты обусловлен смещением центральной длины волны последовательности коротких циклов сканирования (~50 МГц) относительно направления прямого самосканирования частоты.

6. В эксперименте реализована безмодовая лазерная генерация на длине волны 1,42 мкм в висмутовом волоконном лазере со случайной распределенной обратной связью в полукрытом резонаторе. Благодаря применению длинного (150 м) слаболегированного активного волокна функции обратной связи и усиления совмещены в одном волоконном световоде. Спектральная ширина генерации такого лазера в 2–3 раза уже, чем у эквивалентного лазера с резонатором Фабри–Перо. Показано, что основными механизмами уширения спектра являются фазовые самомодуляция и кросс-модуляция.

7. Экспериментально установлено, что волоконный лазер с самосканированием частоты в режиме генерации последовательности одночастотных импульсов может быть эффективно использован в следующих областях:

- спектральная характеристика волоконно-оптических элементов, лазерных спектров и газовых сред со спектральным разрешением до 5 МГц;
- распределённые измерения температуры в оптическом волокне с температурным разрешением 1°C и пространственным разрешением 4 см;
- вибродалнометрия с чувствительностью к вибрации удалённой мишени до 5 нм при частоте вибрации до 7,5 кГц на расстоянии до 13 м;
- Фурье-синтез коротких импульсов с длительностью импульсов до 6 нс.

В числе наиболее значимых прикладных результатов следует выделить создание макета когерентного рефлектометра частотной области, в котором в качестве перестраиваемого источника использован иттербиевый волоконный лазер с эффектом ССЧ – COBRA (Coherent Optical Backscatter Reflectometric Analyzer). Предложенное техническое решение защищено патентом [A43].

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. *Poddubrovskii N.R., Drobyshev R.V., **Lobach I.A.**, Kablukov S.I.* Fiber Lasers Based on Dynamic Population Gratings in Rare-Earth-Doped Optical Fibers // *Photonics* — 2022. — vol. 9, no. 9. — p. 613
- A2. ***Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Skvortsov M.I., Podivilov E.V., Melkumov M.A., Babin S.A., Dianov E.M.* Narrowband random lasing in a Bismuth-doped active fiber // *Scientific Reports* — 2016. — vol. 6, no. 1. — p. 30083
- A3. ***Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A.* Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating // *Laser Physics Letters* — 2014. — vol. 11, no. 4. — p. 045103
- A4. ***Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Podivilov E.V., Fotiadi A.A., Babin S.A.* Fourier synthesis with single-mode pulses from a multimode laser // *Optics Letters* — 2015. — vol. 40, no. 15. — p. 3671
- A5. *Sugavanam S., Fabbri S., Le S. T., **Lobach I.**, Kablukov S., Khorev S., Churkin D.* Real-time high-resolution heterodyne-based measurements of spectral dynamics in fibre lasers // *Scientific Reports* — 2016. — vol. 6, no. 1. — p. 23152
- A6. ***Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Melkumov M.A., Khopin V.F., Babin S.A., Dianov E.M.* Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping // *Optics Express* — 2015. — vol. 23, no. 19. — p. 24833
- A7. *Budarnykh A., **Lobach I.**, Kablukov S.* Self-sweeping Tm-doped fiber laser with wavelength stopping // *Laser Physics Letters* — 2019. — vol. 16, no. 2. — p. 025108
- A8. *Budarnykh A.E., Vladimirskaya A.D., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I.* High-resolution analysis of the wavelength stopping effect in a self-sweeping fiber laser // *Laser Physics Letters* — 2019. — vol. 16, no. 8. — p. 085104
- A9. *Budarnykh A.E., Vladimirskaya A.D., **Lobach I.A.**, Kablukov S.I.* Broad-range self-sweeping single-frequency linearly polarized Tm-doped fiber laser // *Optics Letters* — 2018. — vol. 43, no. 21. — p. 5307
- A10. *Vladimirskaya A.D., Kamynin V.A., **Lobach I.A.**, Kablukov S.I.* Robust

operation of linearly polarized broad-range self-sweeping Ho-doped fiber laser // *Laser Physics Letters* — 2021. — vol. 18, no. 7. — p. 075101

A11. *Vladimirskaya A.D., Kamynin V.A., Lobach I.A., Kablukov S.I.* Continuous-wave single-frequency holmium-doped fiber laser based on saturable absorber // *Laser Physics* — 2023. — vol. 33, no. 4. — p. 045102

A12. *Lobach I.A., Kablukov S.I.* Application of a Self-Sweeping Yb-Doped Fiber Laser for High-Resolution Characterization of Phase-Shifted FBGs // *Journal of Lightwave Technology* — 2013. — vol. 31, no. 18. — p. 2982–2987

A13. *Wolf A.A., Dostovalov A.V., Lobach I.A., Babin S.A.* Femtosecond Laser Inscription of Long-Period Fiber Gratings in a Polarization-Maintaining Fiber // *Journal of Lightwave Technology* — 2015. — vol. 33, no. 24. — p. 5178–5183

A14. *Dontsova E.I., Kablukov S.I., Lobach I.A., Dostovalov A.V., Babin S.A., Gladyshev A.V., Dianov E.M., Corbary C., Ibsen M., and Kazansky P.G.* Extracavity and external cavity second-harmonic generation in a periodically poled silica fibre // *Quantum Electronics* — 2016. — vol. 46, no. 11. — p. 989–994

A15. *Budarnykh A.E., Lobach I.A., Kablukov S.I., and Chapovsky P.L.* Detection of nuclear spin isomers of water molecules using self-scanning Tm-doped fiber laser // *Laser Physics Letters* — 2020. — vol. 17, no. 6. — p. 065702

A16. *Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I.* All-fiber Brillouin optical spectrum analyzer based on self-sweeping fiber laser // *Optics Express* — 2017. — vol. 25, no. 15. — p. 17600

A17. *Krivosheina D.A., Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I.* Coherent Optical Frequency Reflectometer Based on a Self-sweeping Fiber Laser for Distributed Measurements // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* — 2023. — vol. 50, no. S3. — p. S305–S313

A18. *Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I.* Coherent optical frequency-domain reflectometer based on a fibre laser with frequency self-scanning // *Quantum Electronics* — 2019. — vol. 49, no. 12. — p. 1121–1126

A19. *Tkachenko A.Y., Smolyaninov N.N., Skvortsov M.I., Lobach I.A., and Kablukov S.I.* A Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometer Based on a Self-Sweeping Fiber Laser for Sensing Applications // *Instruments and Experimental Techniques* — 2020. — vol. 63, no. 4. — p. 532–537

A20. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.* Когерентная оптическая частотная рефлектометрия на основе волоконного самосканирующего лазера: текущее состояние и перспективы развития (обзор) // *Приборы и техника эксперимента* — 2023. — vol. no. 5. — p. 24–31

- A21. Volikova A, **Lobach I**, Kablukov S. Laser vibrometer-rangefinder based on self-sweeping fiber laser // *Optics Express* — 2022. — vol. 30, no. 12. — p. 22025
- A22. Владимирская А.Д., Скворцов М.И., Вольф А.А., Камынин В.А., **Лобач И.А.**, и Каблуков С.И. Влияние концентрации ионов гольмия на эффект самосканирования длины волны в гольмиевом волоконном лазере // *Прикладная фотоника* — 2020. — vol. 7, no. 4. — p. 76–85
- A23. Донцова Е.И., **Лобач И.А.**, Достовалов А.В., Каблуков С.И. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведенной квадратичной нелинейностью // *Прикладная фотоника* — 2016. — vol. no. 4. — p. 342–357
- A24. Воликова А.М., Смолянинов Н.Н., **Лобач И.А.**, and Каблуков С.И. Дальномер на основе иттербиевого волоконного лазера с самосканированием длины волны // *Прикладная фотоника* — 2020. — vol. 7, no. 3. — p. 90–101
- A25. **Lobach I.A.**, Babin S.A., Podivilov E.V., and Kablukov S.I. All-fiber broad-range self-sweeping Yb-doped fiber laser // *Proc. SPIE 8237, Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications, 82371C* — 2012. — p. 82371C
- A26. Budarnykh A.E., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I. Optical Frequency Domain Reflectometer for Spatial-Resolved Gas Sensing // *IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* — 2023. — p. 930–933
- A27. Бударных А.Е., **Лобач И.А.**, Каблуков С.И. Частотный рефлектометр на основе тулиевого волоконного самосканирующего лазера для задач газоанализа // *Материалы X Международного семинара по волоконным лазерам* — 2022. — p. 172–173
- A28. **Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Podivilov E.V., and Babin S.A. Single-frequency self-sweeping fiber lasers // *Fifth Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics* — 2015. — p. 71–73
- A29. **Lobach I.**, Budarnykh A., Vladimirskaia A., and Kablukov S. Broad-range self-sweeping single-frequency Tm-doped fiber laser for sensing applications // *Optoelectronic Devices and Integration VII* — 2018. — p. 29
- A30. Tkachenko A.Y., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I. Brillouin optical spectrum analyzer with modulated pump // *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference* — 2017. — p. 1
- A31. Tkachenko A.Y., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I. Brillouin optical spectrum analyzer based on self-sweeping fiber laser // *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)* — 2017. — p. 2316–2320

- A32. **Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Podivilov E.V., Fotiadi A.A., and Babin S.A. Pulse Coherence in Self-sweeping Fiber Laser // *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* — 2015. — p. STh4L.4
- A33. Budarnykh A., **Lobach I.**, and Kablukov S. 2 μm self-sweeping fiber laser oscillator for LIDAR applications // *Proc. SPIE 12321, Advanced Sensor Systems and Applications XII* — 2022. — p. 123210P
- A34. Budarnykh A., **Lobach I.**, and Smolyaninov N. Automatic control of the tuning parameters of a self-sweeping Tm-doped fiber laser // *Proc. SPIE 11901, Advanced Sensor Systems and Applications XI* — 2021. — p. 119010M
- A35. Budarnykh A., Vladimirskaya A., Skvortsov M., Wolf A., **Lobach I.**, and Kablukov S. Tm-doped fiber laser with control of spectral dynamics // *Proc. SPIE 11028, Optical Sensors* — 2019.— p. 110282T
- A36. Vladimirskaya A.D., Skvortsov M.I., Wolf A.A., Kamynin V.A., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I. Ho-doped fiber laser with wavelength self-sweeping near 2.06 μm for CO 2 spectroscopy // *International Conference Laser Optics (ICLO)* — 2020. — p. 1–1
- A37. Vladimirskaya A.D., Kamynin V.A., and **Lobach I.A.** Single-Frequency Holmium-Doped Fiber Laser with Saturable Absorber // *IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* — 2022. — p. 360–363
- A38. Vladimirskaya A.D., **Lobach I.A.**, and Kablukov S.I. Broad-range self-sweeping linearly polarized Ho-doped fiber laser // *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* — 2021. — p. JW1A.121
- A39. Vladimirskaya A.D., **Lobach I.A.**, Kablukov S.I., and Kamynin V.A. Broad-range self-sweeping Ho-doped fiber laser for N2O spectroscopy tasks // *Proc. SPIE 11901, Advanced Sensor Systems and Applications XI* — 2021. — p. 119010H
- A40. **Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Podivilov E.V., Fotiadi A.A., and Babin S.A. Coherent Combining Of Single-Mode Pulses In A Ring Cavity // *European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference* — 2015. — p. CJ_P_16
- A41. **Lobach I.A.**, Kablukov S.I., Melkumov M.A., Khopin V.F., Babin S.A., and Dianov E.M. All-fiber Bismuth doped self-sweeping laser // *24th International Laser Physics Workshop (LPHYS'15)* — 2015. — p. 8.3.3

A42. **Lobach I.A.**, *Khalipskaya A.B.*, *Kablukov S.I.*, and *Podivilov E.V.* Self-sweeping Yb-doped fiber laser as a source for high-resolution characterization of phase-shifted FBGs // *22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13)* — 2013. — p. 8.1.4

A43. **Лобач И.А.**, *Каблуков С.И.* Способ измерения параметров неоднородностей показателя преломления вдоль оптического волокна и оптический рефлектометр частотной области // *Патент RU 2 797 693 C1* — 2023.

A44. *Бабин С.А.*, *Каблуков С.И.*, **Лобач И.А.** Волоконный источник однонаправленного одночастотного поляризованного лазерного излучения с пассивным сканированием частоты (варианты). // *Патент RU 2 566 385 C1* — 2015.

A45. *Владимирская А.Д.*, *Поддубровский Н.Р.*, **Лобач И.А.**, *Каблуков С.И.* Волоконный кольцевой источник лазерного излучения с пассивным сканированием частоты // *Патент RU 2 801 639 C1* — 2023.

Список цитируемых работ

1. Hughes T. P., and Young K. M. Mode Sequences in Ruby Laser Emission // *Nature* — 1962. — vol. 196, no. 4852. — p. 332–334
2. Одулов, С.Г., Соскин, М.С. Хижняк А. И. Лазеры на динамических решетках: Оптические генераторы на четырехволновой смешении, Наука, 1999. — p. 272
3. Abitan H., Bohr H., and Pedersen C. F. Fiber ring laser with a feedback mirror // *Applied Optics* — 2005. — vol. 44, no. 36. — p. 7802
4. Peterka P., Maria J., Dussardier B., Slavík R., Honzátko P., and Kubeček V. Long-period fiber grating as wavelength selective element in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers // *Laser Physics Letters* — 2009. — vol. 6, no. 10. — p. 732–736
5. Kir'yanov A. V., and Il'ichev N. N. Self-induced laser line sweeping in an ytterbium fiber laser with non-resonant Fabry-Perot cavity // *Laser Physics Letters* — 2011. — vol. 8, no. 4. — p. 305–312
6. Lobach I. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V., Babin S. A. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser // *Optics Express* — 2011. — vol. 19, no. 18. — p. 17632.
7. Fotiadi A. A., Korobko D. A., Zolotovskii I. O., and Taylor J. R. Brillouin-like amplification in rare-earth-doped optical fibers // *Optics Express* — 2021. — vol. 29, no. 24. — p. 40345
8. Hama T., Kouchi A., and Watanabe N. Statistical ortho-to-para ratio of water desorbed from ice at 10 K // *Science* — 2016. — vol. 351, no. 6268. — p. 65–67
9. Soller B. J., Gifford D. K., Wolfe M. S., and Froggatt M. E. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies // *Optics Express* — 2005. — vol. 13, no. 2. — p. 666
10. MacDonald R. I. Frequency domain optical reflectometer // *Applied Optics* — 1981. — vol. 20, no. 10. — p. 1840